

# ПОИСК РАСШИРЯЮЩИХСЯ ОБЛАСТЕЙ H II ВБЛИЗИ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

**М. С. Кирсанова**

*Институт астрономии РАН*

Молодые массивные звезды образуют вокруг себя области ионизованного водорода (H II) за счет поглощения ультрафиолетовых фотонов в окружающих молекулярных облаках. Согласно теории области H II должны быть расширяющимися объектами, пока массивная звезда находится на главной последовательности, но найти признаки расширения, используя наблюдательные данные о реальных объектах, непросто. В докладе проводится обзор диагностических возможностей спектральных линий молекул на примере области H II RCW 120 вокруг O-звезды.

## SEARCH OF EXPANDING H II REGIONS NEAR MASSIVE STARS

**M. S. Kirsanova**

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

Young massive stars produce H II regions in the surrounding material as their parent molecular clouds absorb ultraviolet photons. While a theory describes the H II regions as objects that expand as long as the central star is on the main sequence, it is not straightforward to find confirmations of the expansion in observational data on real objects. The aim of the talk to review diagnostic capabilities of molecular spectral lines using an H II region RCW 120 around an O type star as an example.

Массивные звезды редки, но они являются своеобразными галактическими маяками, указывая на места с активным звездообразованием благодаря своему мощному ультрафиолетовому (УФ) излучению и различным процессам обратной связи с межзвездной средой.

Рождение молодой массивной звезды сопровождается образованием вокруг нее области ионизованного водорода (H II) из-за мощного потока УФ-фотонов с энергией больше 13.6 эВ. После того как на некотором расстоянии от звезды скорость ионизации становится равной скорости рекомбинации, рост массы ионизованного газа и

объема области H II не останавливается, поскольку существует разница давлений между горячим ионизованным газом и холодным нейтральным газом того облака, в котором образовалась массивная звезда. Возникающая при этом ударная волна (УВ) уплотняет газ родительского облака, поэтому дальнейший процесс расширения области H II сопровождается ростом массы плотного слоя, который движется от ионизирующей звезды вглубь облака. Весь процесс хорошо описан в книге [1]. Радиус области H II увеличивается со временем как  $r_{\text{ioniz}} \sim t^{4/7}$  при идеализированной постановке задачи о расширении в однородное молекулярное облако [2]. Для типичных условий в межзвездной среде время достижения равновесия оказывается на порядок величины больше, чем время жизни массивной звезды на главной последовательности [1]. Поэтому наблюдаемые области H II должны быть расширяющимися объектами.

Из-за гравитационной неустойчивости в слое, сжатом УВ, начинается процесс фрагментации с последующим образованием молодых массивных звезд в плотных сгустках, на которые распадается слой. Этот механизм образования звезд «сбор и сжатие» был рассмотрен, например, в работе [3]. Кроме индуцирования образования плотных сгустков со звездообразующими объектами в них УВ может обжимать уже существующие плотные сгустки газа, ускоряя наступление условий для гравитационной неустойчивости в них. Недавний обзор литературы по звездообразованию вокруг областей H II представлен в работе [4].

Плотные слои сжатого УВ газа вокруг областей H II видны как инфракрасные (ИК) кольцевые туманности на изображениях, полученных при помощи телескопов “Spitzer” и “Herschel” [5]. В работах [6] и [7] указывается на большую долю массивных объектов среди (прото)звезд вокруг областей H II. В этих работах отмечено, что до 30 % всех массивных звезд в Галактике могут быть образованы из-за воздействия УВ от расширяющихся областей H II на молекулярные облака. Несмотря на долгую историю исследования индуцированного звездообразования, в том числе процесса «сбора и сжатия», до сих пор не найдена область H II, вокруг которой в *движущемся плотном слое* находятся молодые (прото)звезды. Для теории звездообразования найти такие объекты было бы очень важно, поскольку это означало бы, что значительная доля массивных звезд образуется при одинаковых и достаточно хорошо определенных начальных условиях. Однако на сегодняшний момент приходится в основном довольствоваться косвенным указанием на то, что область H II ин-

дуцировала или как-то повлияла на звездообразование — находить молодые (прото)звезды в направлении на ИК-кольцевые туманности (например, [8]).

Скорость расширения области Н II достаточно быстро падает по мере ее расширения. На рис. 1 показана скорость газа вблизи области Н II для модели RCW 120 (ионизирующая звезда с эффективной температурой 37 000 К, начальная плотность газа  $10^4 \text{ см}^{-3}$  [9]). Возраст RCW 120 около 600 тыс. лет, модель дает скорость расширения не более 1 км/с. Из рисунка видно, что скорость расширения превышает типичную дисперсию скоростей в областях образования массивных звезд 2–3 км/с только на раннем этапе эволюции, продолжительность которого в разы меньше, чем возраст области Н II размером в 1 пк. Поэтому ожидать, что на картах излучения в линиях молекул обнаружатся значительные (до нескольких км/с) сдвиги спектральных линий, можно только для меньшинства наблюдаемых областей Н II.

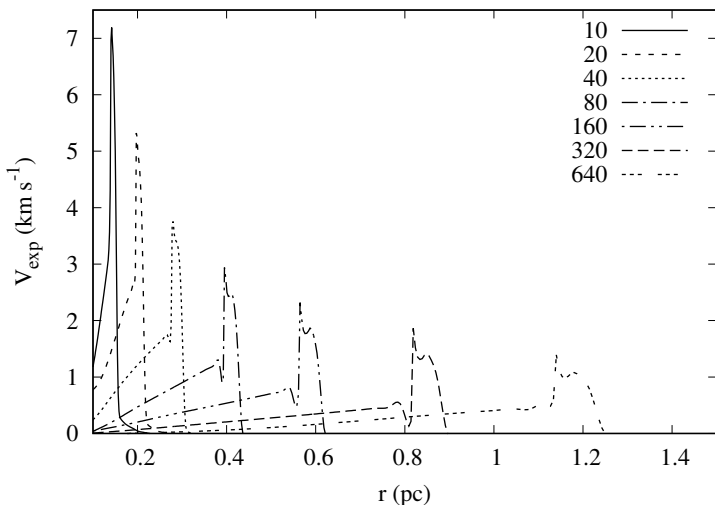


Рис. 1. Скорость газа вблизи области Н II. Расстояние до звезды показано по горизонтальной оси (звезда находится в области  $r = 0$ ), значение скорости — по вертикальной. Рисунок для модели области Н II RCW 120 — из работы [9]. Показана скорость газа для нескольких возрастов области Н II, которые обозначены на легенде (в тыс. лет)

Для областей Н II наподобие RCW 120, где скорость расширения невысока, приходится прибегать к более сложному анализу — анализу изменения формы и яркости спектральных линий на картах. Для иллюстрации на рис. 2 показан схематический вид окрестностей области Н II, которая окружена так называемой областью фотодиссоциации (ФДО). В ФДО физические и химические процессы определяются в основном поглощением УФ-фотонов с энергией меньше потенциала ионизации водорода 13.6 эВ вплоть до примерно 11 эВ — потенциала ионизации углерода. В зависимости от удаления от звезды углерод может наблюдаться преимущественно либо в виде иона  $C^+$ , либо в виде молекулы CO. В соответствии с этим разделением спектральные линии излучения молекулы CO могут иметь тот или иной вид (см. примеры профилей линий на рисунке).

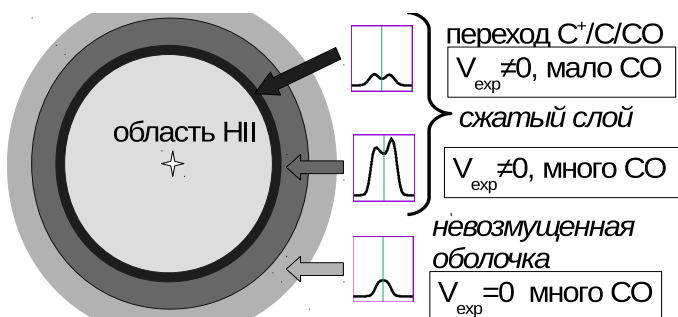


Рис. 2. Схематический вид ФДО — окрестностей области Н II. Светло-серый — ионизованный газ; черный — возмущенный слой ФДО, где углерод в основном в виде  $C^+$ ; темно-серый — возмущенный слой, где углерод в основном в виде CO; черный — невозмущенная оболочка, где углерод в основном в виде CO. Также показаны модельные профили спектральных линий. Рисунок взят из работы [10]

Для модели области RCW 120 из работы [9] часть возмущенного UV слоя содержит углерод преимущественно в виде  $C^+$  (черный на рис. 2), в этом слое мало CO, поэтому линии CO будут оптически тонкими, а максимальное расстояние в км/с между пиками на карте профилей линий будет соответствовать удвоенной скорости расширения  $2V_{\text{exp}}$ , поскольку симметричный двугорбый профиль линии объясняется эффектом проекции расширяющейся оболочки. Далее от звезды, куда фотоны с энергиями 11–13 эВ уже не проникают, находится та часть возмущенного плотного слоя, где углерод присут-

ствуется в виде CO, и за счет значительной оптической толщины линий CO формируется двухпиковый скошенный профиль линии. Еще дальше от звезды находится невозмущенный молекулярный газ, где профили линий CO могут быть либо одnogорбыми, либо двугорбыми в зависимости от энергии перехода и изотопомера молекулы CO. Согласно схеме на рис. 2 анализ профилей линий помогает отделить уплотненный UV движущийся газовый слой от невозмущенной оболочки.

Используя архивные данные телескопа APEX, можно получить карту излучения изотопомеров молекулы CO в различных переходах в направлении области H II RCW 120. Наблюдательные профили линий CO двугорбые, что вызвано совместным действием эффектов проекции движущегося слоя, уплотненного UV, и самопоглощением. Расстояние между пиками на профилях линий сравнимы с теоретическими значениями. Спектральные карты в направлении RCW 120 не противоречат модели расширения области H II и окружающего ее плотного молекулярного слоя со скоростью около 1 км/с.

Кроме сложностей анализа профилей линий излучения молекул, связанных с эффектом оптической толщины, конечное угловое разрешение телескопа также ограничивает возможности исследователя. На рис. 3 показаны радиальные распределения физических параметров вокруг модельной области H II (для параметров RCW 120 из работы [9]) и радиальные распределения интенсивности излучения молекулы CO для нескольких переходов без свертки с диаграммой направленности и с учетом свертки. Из рис. 3 видно, что после свертки двухпиковые теоретические радиальные распределения интенсивности размываются и становятся однопиковыми. Сжатый слой исчезает на радиальных распределениях в линии CO(1–0). Пики излучения в линиях CO(2–1) и CO(3–2) соответствуют внешней части сжатого слоя. Пик излучения в линии CO(4–3) лежит ближе к наиболее плотной части сжатого слоя. Интенсивность излучения в линиях CO(5–4) и CO(6–5) в направлении невозмущенной оболочки меньше 1 К. Видно, что излучение в этих линиях является хорошим индикатором сжатого слоя, а максимальные интенсивности приходятся на наиболее плотную и холодную его часть — не за счет температуры газа, а исключительно за счет высокой плотности газа, сжатого UV.

Таким образом, даже для протяженных областей H II, угловой размер которых составляет несколько минут дуги, только наиболее крупные одиночные телескопы и линии CO, соответствующие тре-

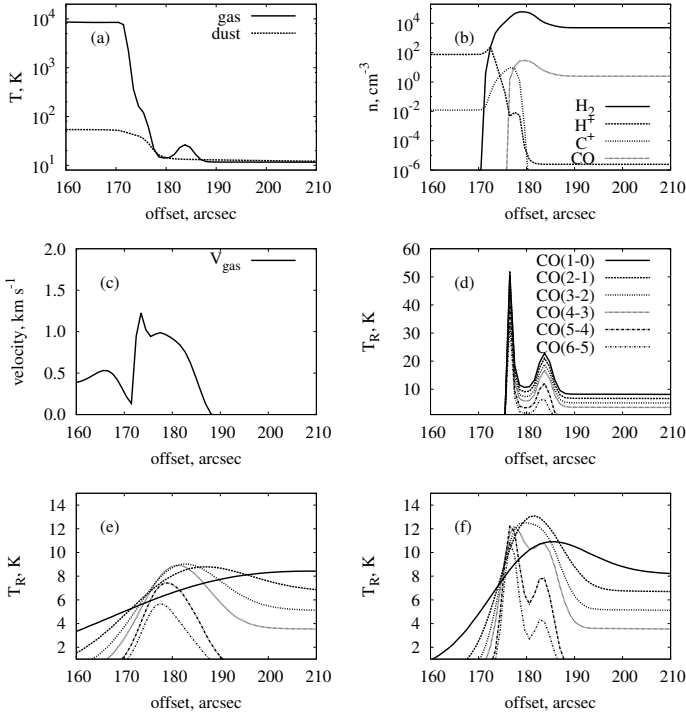


Рис. 3. Результаты моделирования RCW 120 — радиальные распределения физических параметров и химических содержаний, а также модельные яркостные температуры спектральных линий. По горизонтальной оси показано угловое расстояние от звезды в секундах. На панелях: *a* — температура газа и крупной пыли; *b* — содержания химических компонентов; *c* — скорость газа; *d* — интенсивность излучения линий CO без свертки, показывают интенсивности излучения линий CO с учетом свертки с диаграммой направленности: *e* — 12-метрового, *f* — 30-метрового телескопа. Рисунок взят из работы [11]

ткьему и выше уровням возбуждения, позволяют добиться достаточного пространственного разрешения для выделения слоя, сжатого UV, на фоне невозмущенного молекулярного облака. Другая возможность — переход к наблюдениям на интерферометрах, что решает вопрос ограниченного углового разрешения, но создает сложности, связанные с потерей информации о крупномасштабном излу-

чении молекулярного газа. Выбор инструмента и исследуемой линии излучения зависит от объекта исследования и поставленной задачи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-20049.

## Библиографические ссылки

1. *Dyson J. E., Williams D. A.* The physics of the interstellar medium. — 1997.
2. *Spitzer L.* Physical processes in the interstellar medium. — 1978.
3. *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
4. *Кирсанова М. С.* Индуцированное звездообразование // *Физика космоса : тр. 41-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 81–91.*
5. *Anderson L. D., Zavagno A., Barlow M. J. et al.* Distinguishing between HII regions and planetary nebulae with Hi-GAL, WISE, MIPSGAL, and GLIMPSE // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 537. — P. A1. 1110.3303.
6. *Thompson M. A., Urquhart J. S., Moore T. J. T., Morgan L. K.* The statistics of triggered star formation: an overdensity of massive young stellar objects around Spitzer bubbles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — P. 408–418. 1111.0972.
7. *Kendrew S., Beuther H., Simpson R. et al.* The Milky Way Project and ATLASGAL: The Distribution and Physical Properties of Cold Clumps Near Infrared Bubbles // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 825. — P. 142. 1602.06982.
8. *Deharveng L., Zavagno A., Schuller F. et al.* Star formation around RCW 120, the perfect bubble // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 496. — P. 177–190. 0902.0903.
9. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions — II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 469. — P. 630–638. 1705.00269.
10. *Кирсанова М. С., Павлюченков Я. Н.* Кинематика молекулярной оболочки вокруг области HII RCW120 и звездообразование в ней // *Астрономия-2018 : Современная звездная астрономия 2018. — М. : Тривант, 2018. — С. 186–189.*
11. *Кирсанова М. С.* Линии молекул вблизи областей ионизованного водорода // *Сб. тр. мемориальной конф. 2018 г., посвящен. памяти акад. А. А. Боярчука : науч. тр. Ин-та астрономии РАН. — М. : Янус-К, 2018. — С. 284–289.*